

На правах рукописи

УДК 681.183; 681.5.08

Плешаков Алексей Андреевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ
МНОГОДИАПАЗОННОЙ СОРТИРОВКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ
ДЕТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЕМ
ДИАМЕТРА ПНЕВМАТИЧЕСКИМИ УСТРОЙСТВАМИ**

Специальность: **05.13.06** – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва, 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Волгоградский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Кристалль Марк Григорьевич

Официальные оппоненты: **Вартанов Михаил Владимирович**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Московский государственный
машиностроительный университет (МАМИ)»,
профессор кафедры
«Технология машиностроения»

Петрешин Дмитрий Иванович,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Брянский государственный
технический университет»,
директор учебно-научного
технологического института

Ведущая организация: **Саратовский государственный технический
университет имени Гагарина Ю. А.**
(СГТУ имени Гагарина Ю.А.)

Защита состоится «_____» _____ 2016 г. на заседании диссертационного совета Д 212.141.06 в Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5 стр. 1

Телефон для справок: (499) 267-09-63

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью, просим выслать по указанному адресу

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н. Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru

Автореферат разослан «_____» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
доцент



Михайлов Валерий Павлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Для обеспечения качества сборки прецизионных подшипников, бурового породоразрушающего инструмента и других изделий машиностроения применяют метод групповой взаимозаменяемости, требующий сортировки сопрягаемых деталей в размерные группы. Большая программа выпуска и обширная номенклатура изделий подшипниковой промышленности и производств бурового инструмента вызывает необходимость использовать автоматические контрольно-сортировочные устройства (АКСУ) для разделения цилиндрических деталей, в частности, роликов подшипников и твердосплавных зубков буровых коронок и долот, в размерные группы по величине диаметра.

Допуск на диаметр твердосплавных зубков составляет 200...300 мкм, и при сортировке в 22...44 размерные группы допускаемая ГОСТ 8.051-81 «Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм» погрешность контроля диаметра не превышает $\pm 0,7... \pm 0,8$ мкм. Допуск на диаметр зубков шире измерительного диапазона, в котором средства измерений в составе известных АКСУ обеспечивают требуемую точность контроля. Это вызывает необходимость использовать несколько измерительных устройств, совместно охватывающих требуемый диапазон сортировки, что усложняет процесс сборки и снижает его производительность. Поэтому актуальна разработка новых устройств, обеспечивающих требуемую точность контроля диаметра сортируемых деталей в расширенном измерительном диапазоне, для применения их в составе АКСУ.

В условиях производства целесообразно применять бесконтактные пневматические измерительные устройства, поскольку они нечувствительны к вибрационным и ударным воздействиям, влиянию электромагнитных полей и запыленности, исключают механическое воздействие на поверхность сортируемых деталей и износ измерительных и контактных поверхностей. Однако известные пневматические устройства обеспечивают требуемую точность контроля в измерительном диапазоне шириной не более 150 мкм, что недостаточно для сортировки деталей с вышеуказанным допуском на диаметр.

Перспективны пневматические устройства временного преобразования размера (УВП), которые оснащают системой автоматического управления измерительным процессом, чтобы обеспечить преобразование контролируемой величины диаметра сортируемых деталей во временной интервал опустошения измерительной камеры. Но известные УВП выполнены на устаревшей элементной базе и обеспечивают требуемую точность контроля в недостаточно широком измерительном диапазоне. Поэтому для использования УВП в составе АКСУ требуется их модернизация и совершенствование.

В научно-технической литературе, посвященной УВП, приведены, в основном, инженерные решения. Не обнаружены аналитические модели, описывающие динамику работы УВП, которые необходимы для выявления путей их совершенствования. Не освещены вопросы влияния рабочих и конструктивных параметров УВП на точность и производительность контроля.

С учетом вышесказанного изучение функционирования УВП для выявления путей их совершенствования с целью обеспечить требуемую точность и

производительность автоматической многодиапазонной сортировки цилиндрических деталей по величине диаметра является актуальной научной и практической задачей, решение которой позволит повысить качество и производительность сборки изделий машиностроения.

Целью диссертационной работы является обеспечение требуемых показателей точности и производительности автоматической многодиапазонной сортировки цилиндрических деталей по величине диаметра путем управления процессом измерения пневматическими устройствами временного преобразования размера сортируемых деталей.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

- модернизация процесса временного преобразования размера сортируемых деталей за счет оснащения измерительной схемы современной системой автоматического управления измерительным процессом;
- получение модели динамики опустошения измерительной камеры и анализ формирования погрешности измерений устройствами временного преобразования размера для выявления путей обеспечения требуемых показателей точности и производительности автоматической сортировки;
- разработка новых схем временного преобразования размера сортируемых деталей, обеспечивающих требуемую точность сортировки за счет повышенной чувствительности в расширенном измерительном диапазоне и нечувствительности к колебаниям давления питания, а также алгоритмов управления измерительным процессом в этих схемах;
- экспериментальная оценка теоретических положений, опытное уточнение разработанных моделей и проверка их адекватности;
- разработка пневматических средств измерений с временным преобразованием размера, методик их расчета и эксплуатации и конструктивных исполнений автоматических контрольно-сортировочных устройств на их основе.

Научная новизна и выносимые на защиту положения:

На основе полученных моделей динамики опустошения измерительной камеры и формирования погрешности измерений пневматическими устройствами временного преобразования размера сортируемых деталей:

1. Разработаны новые схемы временного преобразования размера, обладающие повышенной чувствительностью в расширенном измерительном диапазоне и нечувствительные к колебаниям давления питания, а также алгоритмы автоматического управления измерительным процессом по этим схемам;
2. Установлены зависимости точности и быстродействия устройств временного преобразования размера от их рабочих и конструктивных параметров, позволившие определить их рациональное сочетание для обеспечения требуемых точности и производительности сортировки.

Практическая ценность и реализация результатов работы. Разработаны новые устройства временного преобразования размера сортируемых деталей (получено 5 патентов РФ на п. м.). Предложены методики и рекомендации расчета рабочих и конструктивных параметров, оценки точности и производительности, а также эксплуатации этих УВП. Разработано программное обеспечение для автоматического управления процессом сортировки в разработанных уст-

ройствах (получено 2 свидетельства о Гос. регистрации программы для ЭВМ). Работа выполнена в рамках гранта №35/762-15 ВолгГТУ. Ее результаты внедрены в учебный процесс на кафедре «Автоматизация производственных процессов». Техническая документация на разработанное автоматическое устройство для сортировки твердосплавных цилиндрических зубков буровых коронок передана для внедрения на ЗАО ПСК «Сталь-Трест» (г. Апрелевка).

Личный вклад автора. Проведен анализ существующих средств автоматической сортировки цилиндрических деталей по величине диаметра. Предложена классификация средств измерений, позволившая обосновать целесообразность применения УВП и выявить пути их совершенствования. Получены модели динамики опустошения измерительной камеры и формирования погрешности УВП. Предложены новые схемы временного преобразования, обладающие повышенной чувствительностью в расширенном измерительном диапазоне и нечувствительные к колебаниям давления питания, а также алгоритмы автоматического управления измерительным процессом по этим схемам. Проведены опытные исследования разработанных схем на специально изготовленной экспериментальной установке. Разработаны методики и рекомендации по расчету рабочих и конструктивных параметров, оценки точности и производительности, а также эксплуатации типовых АКСУ на основе предложенных УВП.

Методы исследований. Теоретические исследования проведены с использованием законов газовой динамики, методов вычислительной математики, статистического и компьютерного моделирования. Экспериментальные исследования выполнены на специально разработанной установке с применением статистических методов обработки опытных данных.

Апробация работы. Материалы диссертационного исследования обсуждались на симпозиумах «Неделя горняка» (Горный институт НИТУ «МИСиС»). М., 2013, 2015, 2016; научно-технических конференциях «Производительность и надежность технологических систем в машиностроении» (МГТУ им. Н.Э. Баумана). М., 2015; «Прогрессивные технологии в машиностроении» (ВолгГТУ). Волгоград, 2014; «Сборочные соединения». Польша, Жешув–Кочев, 2013; «Сборочные соединения – конструкция и технология». Польша, Жешув–Полянчик, 2016; «Прогрессивные направления развития машиноприборостроения, транспорта и экологии» (СевНТУ). Севастополь, 2013.

Публикации. По теме диссертации опубликована 21 работа общим объемом 6,1 п. л., в том числе 6 в журналах Перечня ВАК РФ (одна в переводном издании, цитируемом в Scopus и Web of Science), 5 патентов РФ на полезную модель и 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и результатов и списка литературы из 109 наименований. Общий объем работы составляет 207 страниц, включая 129 страниц машинописного текста, 83 рисунка и 2 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, изложены научная новизна и положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу методов и средств автоматизации контроля и сортировки. Вопросам автоматизации производства посвящены работы Г.А. Шаумяна, Н.И. Камышного, Л.И. Волчкевича (МГТУ им. Н.Э. Баумана), М.В. Вартанова, Б.В. Шандрова (Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)), Д.И. Петрешина (БГТУ), Ю.М. Золотаревского (ФГУП ВНИИОФИ), В.В. Прейса (ТулГУ) и других отечественных и зарубежных ученых. В частности, исследованием методов и средств автоматизации контроля и сортировки занимались П.И. Буловский, М.Г. Кристаль, Б.М. Сорочкин и другие.

Многодиапазонная сортировка предполагает измерение размера детали для выбора соответствующей размерной группы, куда ее направляют. Точность и, во многом, производительность сортировки определяется используемым измерительным устройством. Разработана классификация (Рис. 1) средств измерений в составе АКСУ с точки зрения источников погрешности контроля.



Рис.1. Классификация измерительных средств АКСУ (*предложены автором)

Установлено, что в условиях производства целесообразно использовать бесконтактные пневматические устройства, поскольку они нечувствительны к вибрационным и ударным воздействиям, влиянию электромагнитных полей и запыленности, исключают механическое воздействие на поверхность сортируемых деталей и износ контактных поверхностей.

Разработкой пневматических методов и средств автоматизации занимались в Институте проблем управления РАН, МГТУ «Станкин», ИжГТУ, Бюро взаимозаменяемости, National Physical Laboratory (Великобритания). Исследованиям в этой области посвящены работы И.А. Авцинова, М.В. Вартанова, А.А. Иванова, Б.А. Сентякова. Большой вклад в изучение пневматических устройств для контроля линейных размеров внесли О.Б. Балакшин, С.С. Волосов, В.И. Глухов, Л.Е. Куратцев, В.И. Леун, А.Б. Линд, В.М. Мурашов, Е.И. Педь, Ф.В. Цидулко, W. Gorsky, M. Graneek, I.G. Morgan, J.C. Evans.

Наиболее распространены пневматические устройства с проточной измерительной камерой, в основе работы которых лежит зависимость параметров поступающего в нее и истекающего в атмосферу сжатого воздуха от контролируемого размера. Например, в манометрических устройствах давление $p_{\text{ИЗМ}}$ воздуха в измерительной камере зависит от площади F_3 истечения его в атмосферу через измерительный зазор между срезом измерительного сопла и поверхностью контролируемой детали, диаметр D которой и определяет величины F_3 и, следовательно, $p_{\text{ИЗМ}}$. Несмотря на вышеуказанные преимущества, известные устройства с проточной измерительной камерой обеспечивают требуемую точность контроля в измерительном диапазоне шириной не более 150 мкм, что недостаточно для сортировки деталей с допуском 200...300 мкм.

Перспективны УВП с опустошением глухой измерительной камеры, разработкой которых занимались Р.Ю. Стефанюк, А.И. Сутин и О.С. Харькин (ВолгГТУ). Здесь в качестве оценки диаметра D детали используют пропорциональный ему временной интервал $t_{\text{ИЗМ}}$ опустошения камеры, для определения которого УВП оснащают системой автоматического управления измерительным процессом, включающей командный блок, измеритель временных интервалов и пороговый элемент. В камеру подают сжатый воздух, который истекает в атмосферу через измерительный зазор. Его давление $p_{\text{ИЗМ}}$, по манометрическому принципу, пропорционально диаметру D . В момент t_1 командным блоком переключая клапан, отсоединяют камеру от источника сжатого воздуха для опустошения ее в атмосферу через выходной дроссель постоянного сечения и запускают измеритель временных интервалов. В момент t_2 давление $p(t)$ воздуха в камере снижается до нижнего порогового уровня $p_{\text{н}}$, и срабатывает пороговый элемент, останавливая счет измерителя. Интервал $t_{\text{ИЗМ}} = (t_2 - t_1)$ (результат временного преобразования) пропорционален начальному уровню давления $p_{\text{ИЗМ}}$ и диаметру D , для оценки которого используется.

Этим устройствам присущ ряд недостатков: **1.** Их чувствительность $\xi = dt_{\text{ИЗМ}} / dD$ и, как следствие, точность снижаются при расширении измерительного диапазона, что свойственно большинству пневматических устройств. **2.** Они чувствительны к колебаниям давления $p_{\text{п}}$ питания (давления воздуха до его поступления в измерительную камеру), уровень которого оказывает влияние на длительность $t_{\text{ИЗМ}}$ опустошения измерительной камеры и, как следствие, на результат \hat{D} измерений. **3.** Измерение интервала $t_{\text{ИЗМ}}$ начинают в момент t_1

подачи сигнала переключения клапана, но длительность Δt_k его переключения, являясь случайной величиной в составе результата $t_{изм}$ временного преобразования, обуславливает его случайный характер. 4. Известные системы управления измерительным процессом УВП выполнены на базе мембранных компонентов универсальной системы промышленной пневмоавтоматики (УСЭППА), которым присущ гистерезис и нестабильность срабатывания, многие из которых на данный момент сняты с производства.

Эти факторы обуславливают высокую погрешность Δ контроля, ограничивая применение УВП для сортировки деталей с групповым допуском $5...10$ мкм в диапазоне сортировки $200...300$ мкм. Кроме того, известные УВП обладают недостаточно высоким быстродействием.

Сделан вывод о необходимости модернизации УВП: оснащения их современной системой управления измерительным процессом и разработки соответствующих алгоритмов управления. Для обеспечения требуемой точности и производительности сортировки процесс временного преобразования нуждается в совершенствовании: необходимо обеспечить высокую чувствительность ξ УВП в расширенном до $200...300$ мкм измерительном диапазоне, нечувствительность к колебаниям давления $p_{п}$ питания и повысить их быстродействие.

В научно-технической литературе, посвященной УВП, приведены, в основном, инженерные решения. Не обнаружены аналитические модели, описывающие динамику их работы и влияние рабочих и конструктивных параметров УВП на точность и производительность контроля. Поэтому для выявления путей совершенствования процесса временного преобразования и обеспечения требуемых показателей точности и производительности сортировки необходима разработка таких моделей. Уточняются цели и задачи исследования.

Во второй главе приведены теоретические исследования устройств с временным преобразованием размера сортируемых деталей.

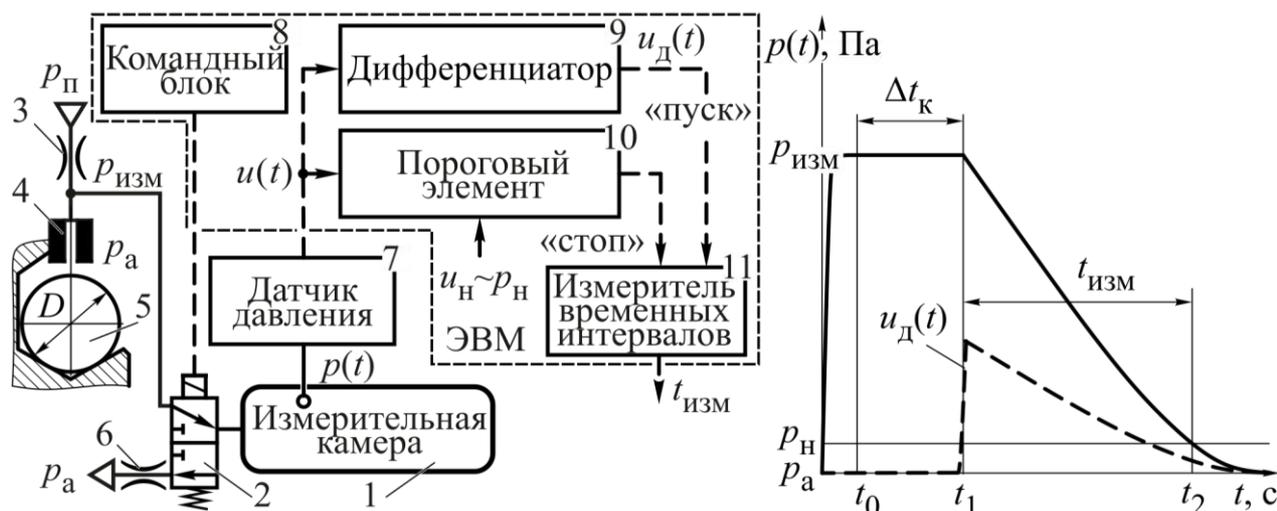


Рис. 2. Модернизированное устройство временного преобразования размера

Для устранения недостатков механических компонентов УВП предложена модернизированная схема (Рис. 2) временного преобразования размера сортируемых деталей. Она содержит измерительную камеру 1, соединенную через

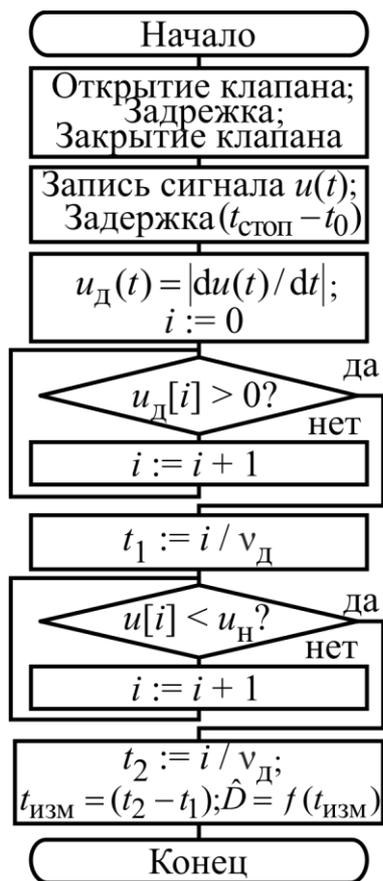


Рис. 3. Алгоритм управления измерительным процессом в модернизированных УВП

клапан 2 с источником сжатого воздуха через входной дроссель 3 и с измерительным соплом 4, между срезом которого и поверхностью контролируемой детали 5 образуется измерительный зазор, выходной дроссель 6, датчик 7 давления, преобразующий давление $p(t)$ в камере 1 в электрический цифровой сигнал $u(t)$, и основанную на ЭВМ систему автоматического управления измерительным процессом, включающей командный блок 8, дифференциатор 9, пороговый элемент 10 и измеритель 11 временных интервалов.

Управление измерительным процессом осуществляют следующим образом (Рис. 3). После базирования детали 5 клапан 2 переключают командным блоком 8, подавая в камеру 1 сжатый воздух, где устанавливается давление $p_{изм}$, пропорциональное диаметру D детали 5, и откуда он истекает в атмосферу через измерительный зазор. В момент t_0 подают сигнал переключения клапана 2 для отсоединения камеры 1 от источника сжатого воздуха и измерительного сопла 4 и опустошения ее в атмосферу через выходной дроссель 6. Одновременно начинают запись в память ЭВМ сигнала $u(t)$, отражающего изменение давления $p(t)$ в камере 1 от измерительного

$p(t_0) = p_{изм}$ до атмосферного p_a . По завершении записи дифференциатор 9 формирует массив $u_д(t) = |du(t)/dt|$ значений, отражающих скорость изменения давления $p(t)$. Как указано выше, длительность Δt_k переключения клапана случайна, и в действительности опустошение камеры начинается в момент $t_1 = (t_0 + \Delta t_k)$, сопровождаясь скачкообразным возрастанием скорости изменения давления $p(t)$. Значения $u_д(t)$ сравнивают с нулем и при появлении первого положительного значения $u_д(t_1) > 0$ записывают время t_1 . Посредством порогового элемента 10 значения $u(t_1..t_{стоп})$ сигнала $u(t)$ последовательно сравнивают с нижним пороговым значением $u_н \sim p_н$ и при $u(t_2) \leq u_н$ записывают в память ЭВМ время t_2 . С помощью измерителя 11 определяют результат $t_{изм} = (t_2 - t_1)$ временного преобразования, затем по функции преобразования вычисляют результат $\hat{D} = f(t_{изм})$ измерений.

Модернизированное исполнение УВП позволяет устранить погрешности механических компонентов, а также компенсировать погрешность Δt_k , связанную со случайным характером длительности переключения клапана. Для поиска путей дальнейшего совершенствования процесса временного преобразования получены модели (1) динамики опустошения измерительной камеры и (2)

формирования погрешности Δ УВП, позволившие получить передаточные функции $t_{\text{ИЗМ}} = f(D)$, обратные им функции $\hat{D} = f(t_{\text{ИЗМ}})$ преобразования и погрешность Δ контроля с учетом рабочих и конструктивных параметров УВП.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{V}{R_B T} \frac{dp(t)}{dt} = -M; \\ p(t_D) = p_{\text{ИЗМ}}; \\ p(t_H) = p_H; \\ t_{\text{ИЗМ}} = t_H - t_D, \end{array} \right. \quad (1) \quad \begin{array}{l} \text{Здесь } V - \text{ объем измерительной камеры; } R_B - \text{ газовая} \\ \text{ постоянная для воздуха; } T - \text{ температура воздуха в} \\ \text{ камере; } M - \text{ массовый расход воздуха в зависимости} \\ \text{ от площади } F \text{ истечения. Ввиду большой разницы} \\ \text{ давлений } p_{\text{ИЗМ}} \text{ до и } p_a \text{ после выхода из измеритель-} \\ \text{ ной камеры, принято предположение о турбулентном} \\ \text{ истечении воздуха через проходное сечение.} \end{array}$$

Погрешность Δ контроля (Рис. 4,г) рассмотрена как результат влияния источников погрешности Δt измерения времени $t_{\text{ИЗМ}}$ опустошения камеры (погрешности временного преобразования): **1.** Колебания давления $p_{\text{П}}$ питания вызывают колебания с размахом $\varepsilon_{\text{ИЗМ}}$ начального давления $p_{\text{ИЗМ}}$, вследствие чего время $t_{\text{ИЗМ}}$ опустошения неодинаково, что обуславливает погрешность $\Delta t_{\text{ДП}}$ (Рис. 4,а). **2.** Погрешность $\varepsilon_{\text{ДД}}$ датчика давления обуславливает случайный характер значения его сигнала $u(t)$, которое может отличаться от действительного значения, отражающего давление $p(t)$. Поэтому равенство давления $p(t)$ пороговому уровню p_H может быть зафиксировано с погрешностью $\Delta t_{\text{ДД}}$ (Рис. 4,б). **3.** При преобразовании сигнала $u(t)$ в цифровую форму $u_{\text{Ц}}(t)$ он заменяется дискретными значениями, которые обновляются с частотой ν_D (Рис. 4,в). Между обновлением сигнала $u_{\text{Ц}}(t)$ его значение больше истинного $u(t) \sim p(t)$. Поэтому, когда давление $p(t)$ снижается до порогового уровня p_H , сигнал $u_{\text{Ц}}(t)$, в общем случае, больше величины $u_H \sim p_H$, и пороговый элемент срабатывает со случайным запаздыванием $\Delta t_D \in [0; \nu_D^{-1}]$. Для расчета погрешности Δ совместно с уравнениями (1) решена система уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} p(t_1) = p_{\text{ИЗМ}} + \tilde{\varepsilon}_{\text{ИЗМ}}, \text{ где } \tilde{\varepsilon}_{\text{ИЗМ}} \in [-0,5\varepsilon_{\text{ИЗМ}}; +0,5\varepsilon_{\text{ИЗМ}}]; \\ p(t_2) + \tilde{\varepsilon}_{\text{ДД}} = p_H, \text{ где } \tilde{\varepsilon}_{\text{ДД}} \in [-0,5\varepsilon_{\text{ДД}}; +0,5\varepsilon_{\text{ДД}}]; \\ t_{\text{ИЗМ}} = (t_2 + \Delta t_D) - t_1, \text{ где } \Delta t_D \in [0; \nu_D^{-1}]. \end{array} \right. \quad (2)$$

Анализ модернизированного процесса временного преобразования на основе полученных моделей позволил установить пути обеспечения требуемой точности контроля и разработать новые измерительные схемы.

1. Предложена **схема повышенной чувствительности**. Принципиальным отличием процесса временного преобразования является то, что измерительную камеру опустошают в атмосферу непосредственно через измерительный зазор. В ранее рассмотренных схемах площадь $F_{\text{ВЫХ}}$ выходного дросселя и, следовательно, скорость $dp(t)/dt$ изменения давления $p(t)$ при опустошении постоянны и независимы от диаметра D , который влияет только на начальный уровень давления $p_{\text{ИЗМ}}$. При опустошении через измерительный зазор диаметр D опре-

деляет площадь F_3 истечения, оказывая влияние одновременно на величины $p_{\text{ИЗМ}}$ и $dp(t)/dt$, поэтому изменение его от D_1 до D_2 приводит к большему изменению $\delta t_{\text{ИЗМ}}$ результата $t_{\text{ИЗМ}}$ временного преобразования, чем $\delta t'_{\text{ИЗМ}}$ в ранее рассмотренных схемах (Рис. 5,а). Так достигается существенное повышение чувствительности $\xi = dt_{\text{ИЗМ}} / dD$ и снижение погрешности Δ контроля.

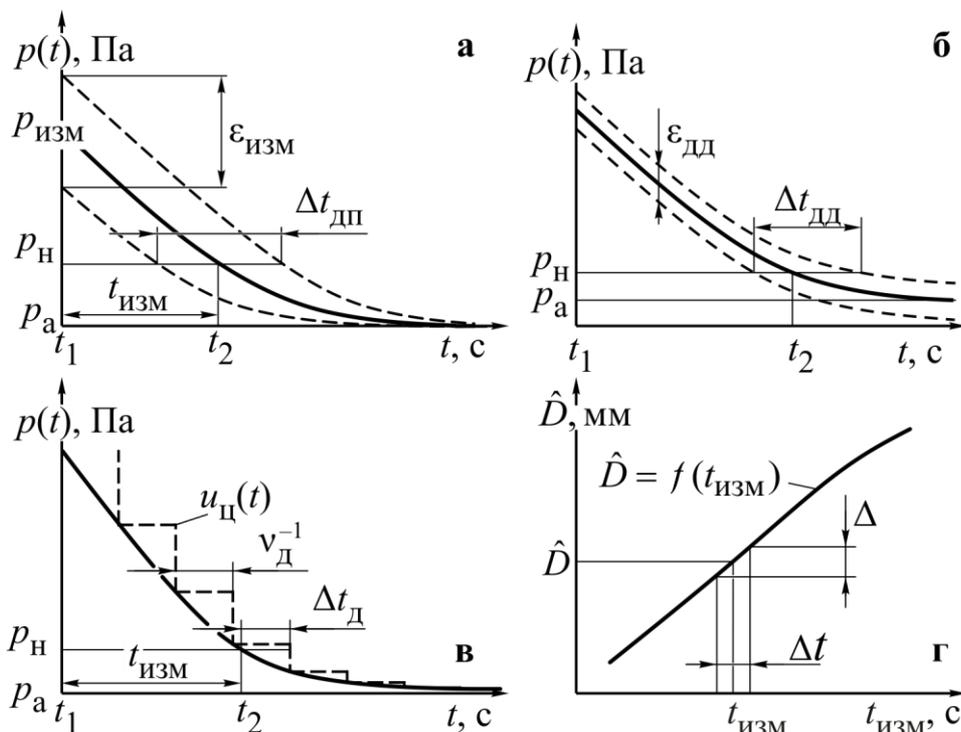


Рис. 4. Формирование погрешности:

а, б, в – временного преобразования; г – измерений

Истечение воздуха через измерительный зазор неравносильно истечению в атмосферу в виде свободной струи: вследствие сужения потока и возникновения пристеночного течения вдоль поверхности детали вероятно повышение расхода M в сравнении с расходом свободного истекающего воздуха. Чтобы учесть это в первое уравнение системы (1) введен эмпирический поправочный функционал $\psi(H)$: $V(R_B T)^{-1} dp/(t)dt = -\psi(H)M$. Функционал $\psi(H)$ зависит от кратчайшего расстояния H между центром окружности в срезе измерительного сопла и поверхностью детали. Его количественная оценка требует опытного исследования, для теоретического анализа принято допущение $\psi(H) = 1$.

2. Установлено, что погрешность $\Delta t_{\text{ДП}}$ от колебаний давления $p_{\text{П}}$ питания составляет до 90% общей погрешности Δt . Для повышения точности контроля предложена **схема, нечувствительная к колебаниям давления питания**. Ее отличает то, что пуск измерителя временных интервалов здесь осуществляют в момент $t_{\text{В}}$, когда давление $p(t)$ воздуха в ней достигает установленного верхнего порогового значения $p_{\text{В}}$, неизменного от измерения к измерению. Для этого систему управления измерительным процессом оснащают дополнительным верхним пороговым элементом. Площадь F_3 и, как следствие, скорость $dp(t)/dt$ опустошения камеры при многократном измерении одной и той же де-

тали неизменны. Постоянны верхний p_B и нижний p_H пороговые уровни давления $p(t)$. Таким образом, если при неизменном диаметре D давление $p(t_1) = p_{\Pi}$ питания изменяется, моменты t_B и t_H достижения пороговых уровней p_B и p_H смещаются относительно начала t_1 опустошения камеры на одинаковую величину $\Delta t_B = \Delta t_H$, а их разность $t_{ИЗМ} = (t_H - t_B + \Delta t_H - \Delta t_B)$ при этом не изменяется (Рис. 5,б). Так достигается нечувствительность УВП к колебаниям давления p_{Π} питания, что обеспечивает снижение погрешности Δ контроля.

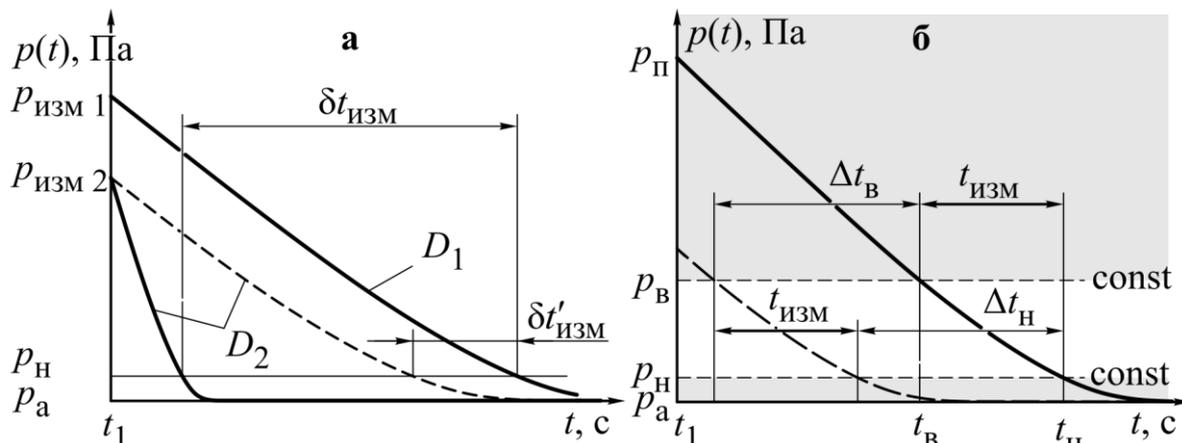


Рис.5. Процесс временного преобразования по схемам: а – повышенной чувствительности; б – нечувствительной к колебаниям давления p_{Π} питания

3. Анализ зависимостей $F_3 = f(D)$ и $t_{ИЗМ} = f(F_3)$ показал, что по известной схеме расположения контролируемой детали в призме, на биссектрисе угла которой лежит ось измерительного сопла (Рис. 2), диаметрам D с допуском 200...300 мкм соответствуют площади F_3 измерительного зазора, лежащие в области сравнительно малых изменений результата $t_{ИЗМ}$ временного преобразования (Рис. 6,б). Предложена **схема с расширенным измерительным диапазоном** (Рис. 6,а), отличием которой является то, что срез сопла 3 располагают в плоскости боковой поверхности призмы 4, базирующей деталь 5. Согласно расчету, при таком относительном расположении измерительного сопла и контролируемой детали диаметрам D с допуском 200...300 мкм соответствует диапазон площадей F_3 , полностью принадлежащий более крутому участку функции $t_{ИЗМ} = f(F_3)$ (Рис. 6,б), что обеспечивает повышение чувствительности ξ УВП и точности контроля диаметров D с таким допуском.

Управление измерительным процессом осуществляют следующим образом: после базирования детали 5 в призме 4 клапан 2 открывают, подавая сжатый воздух под давлением p_{Π} питания в камеру 1, откуда он истекает в атмосферу через измерительный зазор. Начинают запись сигнала $u(t)$ датчика 6 давления в память ЭВМ и закрывают клапан 2, опустошая камеру 1 в атмосферу через измерительный зазор. По записанному сигналу $u(t)$ с помощью пороговых элементов 8 и 9 определяют моменты t_B и t_H достижения давлением $p(t)$ верхнего $p_B \sim u_B$ нижнего и $p_H \sim u_H$ пороговых уровней. Посредством измерителя 10 временных интервалов устанавливают результат $t_{ИЗМ} = (t_H - t_B)$ временного преобразования, по которому вычисляют результат $\hat{D} = f(t_{ИЗМ})$ измерений.

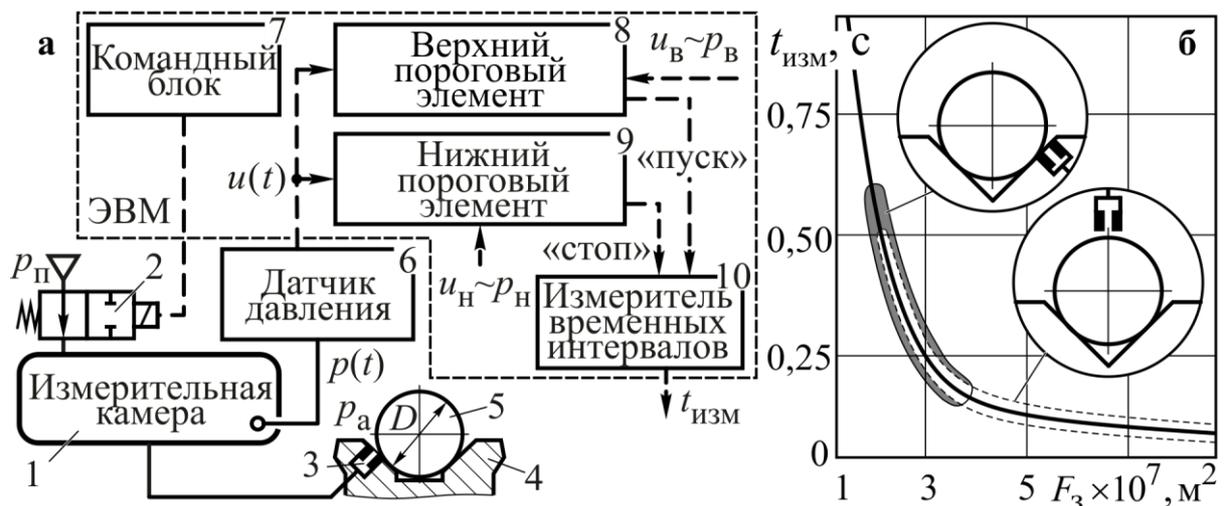


Рис. 6. УВП с расширенным измерительным диапазоном:
 а - принципиальная схема; б – зависимость $t_{\text{изм}} = f(F_3)$

Данная схема сочетает преимущества схем, предложенных в Главе 2 ранее: она обладает повышенной чувствительностью ξ , нечувствительна к колебаниям давления $p_{\text{п}}$ питания и, кроме того, ее измерительный диапазон расширен до 200...300 мкм. Для установления рационального сочетания рабочих и конструктивных параметров УВП на ее основе для обеспечения требуемых показателей точности и производительности сортировки проведена качественная оценка их влияния на погрешность Δ и длительность измерений. Однако допущения, принятые при разработке аналитических моделей, потребовали экспериментальной проверки результатов теоретического исследования.

В третьей главе приведена методика и результаты экспериментального исследования УВП. Специально разработанная опытная установка (Рис. 7) включает модуль 1 временного преобразования, электронный модуль 2, измерительную оснастку 3 и ЭВМ. Модуль 1 выполнен в виде пневматической платы 4. На ней смонтированы электропневматический клапан 5, датчик 6 давления, камера переменного объема 11 и штуцеры для присоединения источника сжатого воздуха и измерительного сопла 7 оснастки 3, содержащей призму 8 базирования детали 12, механизм 9 микроперемещений сопла 7 и индикаторную головку 10. Электронный модуль 2 преобразует сигнал $u(t)$ датчика 6 в цифровую форму и подает его на ЭВМ, оснащенную разработанным программным обеспечением для автоматического управления измерительным процессом.

Методика исследований состояла в построении передаточных функций $t_{\text{изм}} = f(D)$ и обратных им функций $\hat{D} = f(t_{\text{изм}})$ преобразования по усредненным результатам $t_{\text{изм}}$ десятикратных временных преобразований диаметра D пяти цилиндрических эталонов в каждом из диапазонов $D = 6...6,22$ и $10...10,22$ мм. Интервальные оценки $\pm 3\sigma$ погрешностей Δt временного преобразования и Δ контроля получены из выборок по 400 результатов \hat{D} измерений.

Экспериментально определен поправочный функционал $\psi(H)$ модели динамики опустошения измерительной камеры. Для этого получены расчетные и экспериментальные передаточные функции (Рис. 8,а,б). Установлено, что в действительности камера опустошается быстрее, что свидетельствует о повышенном расходе M воздуха через измерительный зазор в сравнении с истечени-

ем в виде свободной струи. Поправочный функционал $\psi(H)$ вычислен как отношение $t_{\text{ИЗМ}}^{\text{Т}}/t_{\text{ИЗМ}}^{\text{Э}}$ теоретических и расчетных результатов временного преобразования и аппроксимирован функцией $\psi(H) = 7,418h \exp(0,451)$ (Рис. 8,в). Данные уточненного расчета с доверительной вероятностью $p = 0,95$ принадлежат к опытным доверительным интервалам, что свидетельствует об адекватности модели и целесообразности использования ее при разработке и настройке УВП.

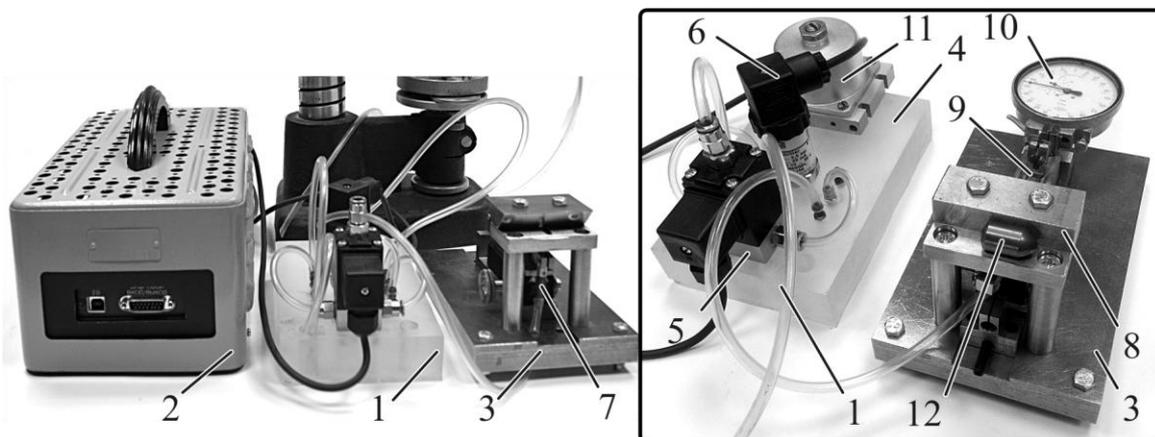


Рис. 7. Установка для изучения процесса временного преобразования

Проведена серия экспериментов, в которых рабочие и конструктивные параметры устройств УВП варьировались на нескольких уровнях, что позволило подтвердить вид их влияния на погрешность Δ и длительность измерений, а также уточнить их рациональное сочетание (см. п. 4, 5 Общих выводов и результатов). Экспериментально установлено, что эти значения позволяют контролировать диаметр D при групповом допуске 5 мкм в диапазоне сортировки 200...300 мкм с погрешностью Δ не более $\pm 0,27... \pm 0,45$ мкм, обеспечивая рекомендуемую ГОСТ 8.051-81 точность сортировки цилиндрических деталей. Время измерения одной детали при этом не превышает 0,3 с. Это делает целесообразным использовать разработанные УВП в составе АКСУ. Оценка $\pm 3\sigma = \pm 0,49... \pm 0,56$ мкм погрешности Δ измерений также получена методом статистического моделирования. Расчетные значения несколько превышают экспериментальные, что идет в запас расчета. Сделан вывод об адекватности модели формирования погрешности УВП и о возможности использования ее для оценки точности контроля на этапе их проектирования.



Рис. 8. Передаточные функции УВП (а,б) и поправочный функционал (в)

В четвертой главе предложены новые УВП и алгоритмы управления измерением и сортировкой. Приведено конструктивное исполнение АКСУ для сортировки твердосплавных зубков буровых коронок (Рис. 9, 10).

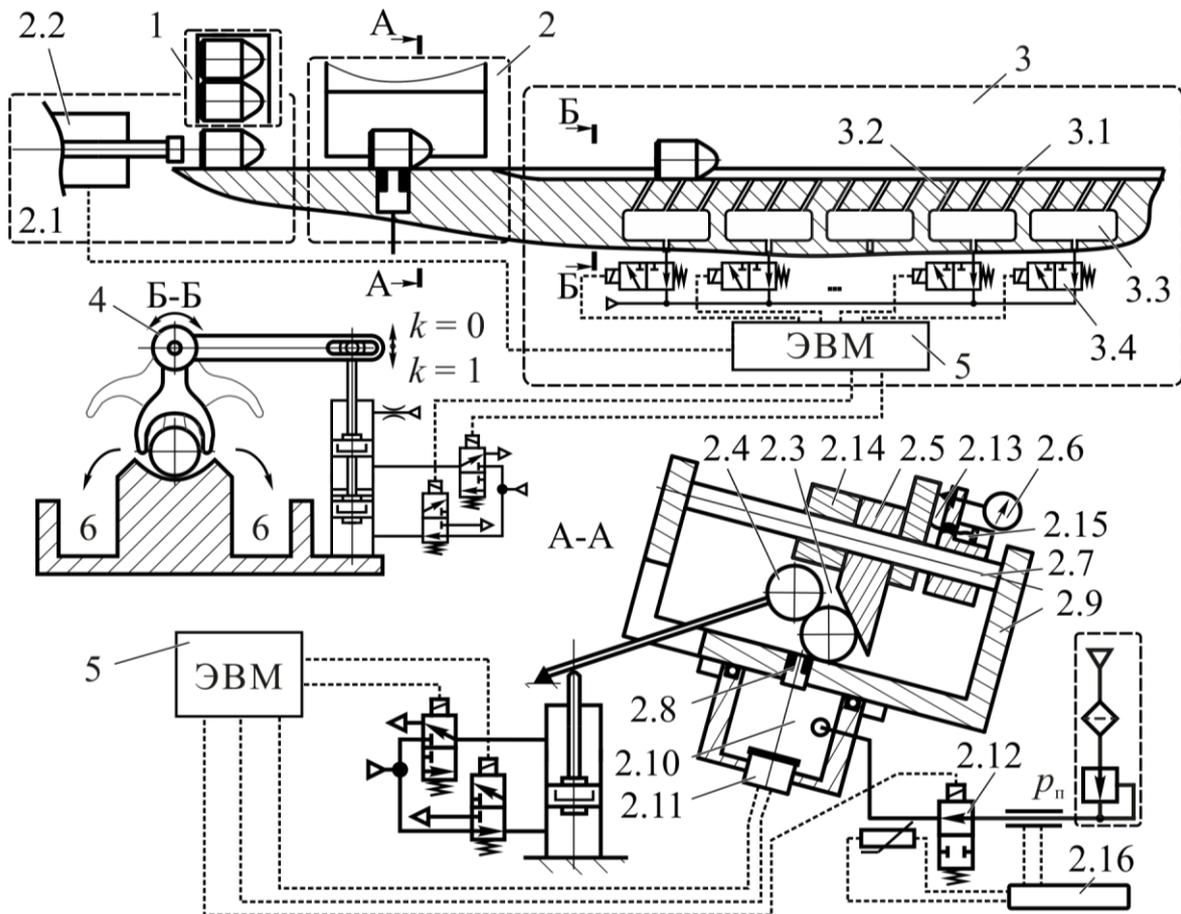


Рис. 9. АКСУ для сортировки зубков буровых коронок: 1 – загрузочное устройство; 2 – измерительное устройство (2.1 – зона поступления; 2.2 – толкатель; 2.3 – зона измерений; 2.4 – механизм закрепления; 2.5 – призма; 2.6 – индикатор; 2.7 – направляющие; 2.8 – сопло; 2.9 – основание; 2.10 – измерительная камера; 2.11 – датчик давления; 2.12 – клапан; 2.13, 2.14 – упоры; 2.15 – микро-винт; 2.16 – система стабилизации температуры); 3 – транспортировочное устройство (3.1 – желоб; 3.2 – сопла; 3.3 – камеры; 3.4 – клапаны); 4 – исполнительное устройство; 5 – ЭВМ; 6 – накопители деталей

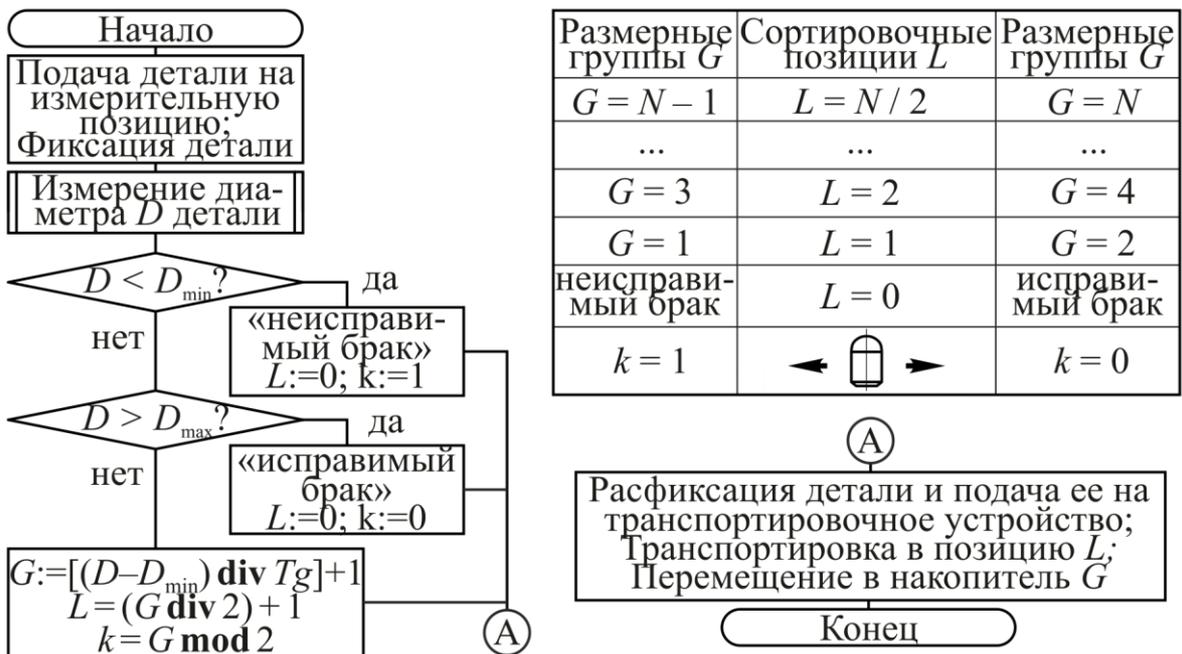


Рис. 10 Алгоритм процесса сортировки зубков буровых коронок

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Из анализа литературных источников, проведенного в соответствии с разработанной классификацией средств измерений, установлено, что для сортировки цилиндрических деталей в 22...44 размерные группы по величине диаметра с групповым допуском 5 мкм в производственных условиях целесообразно применять бесконтактные пневматические измерительные устройства. Но известные устройства такого типа обеспечивают требуемую ГОСТ 8.051-81 точность контроля в недостаточно широком измерительном диапазоне. Перспективны устройства временного преобразования, однако требуется их модернизация за счет оснащения современной системой управления измерительным процессом и совершенствование процесса временного преобразования размера. Отсутствие исследований функционирования УВП делает актуальным проведение таких исследований.

2. Процесс временного преобразования размера деталей модернизирован за счет оснащения измерительной схемы системой автоматического управления измерительным процессом на основе ЭВМ, что позволило устранить погрешности и нестабильность, присущие мембранным элементам.

3. Получена зависимость $t_{\text{ИЗМ}} = f(D)$ результата $t_{\text{ИЗМ}}$ временного преобразования от диаметра D сортируемых деталей и модель формирования погрешности измерений, позволившие с доверительной вероятностью $p = 0,95$ оценить влияние конструктивных и рабочих параметров УВП на их точность и быстродействие, а также выявить пути совершенствования процесса временного преобразования размера для обеспечения требуемых показателей точности и производительности сортировки цилиндрических деталей, на основе чего предложены новые измерительные схемы, и установлено, что:

3.1. Использование измерительного зазора для опустошения измерительной камеры позволяет повысить чувствительность ξ схемы временного преобразования в 13 раз по сравнению со схемой, где опустошение измерительной камеры осуществляют через выходной дроссель с постоянной площадью $F_{\text{ВЫХ}}$ сечения.

3.2. Введение фиксированного верхнего порогового уровня $p_{\text{В}}$ давления и запуск измерителя временных интервалов при снижении давления $p(t)$ в измерительной камере до этого уровня обеспечивает нечувствительность схемы к колебаниям давления $p_{\text{П}}$ питания и снижение погрешности Δ измерений в 1,5...2 раза по сравнению со схемой, где запуск измерителя временных интервалов осуществляют в начале опустошения камеры.

3.3. Расположение среза измерительного сопла в плоскости боковой поверхности призмы, базирующей контролируемую деталь, позволяет расширить измерительный диапазон УВП до 200...300 мкм.

4. Установлено, что в УВП на основе предложенных измерительных схем:

4.1. Уменьшение угла α базирования детали и диаметра d измерительного сопла способствует снижению погрешности Δ измерений. При $D = 6,00...6,22$ мм: уменьшение α от 90° до 60° способствует снижению Δ в

1,7 раза; от 90° до 30° – в 2,7 раза; уменьшение d от 2 до 1 мм способствует снижению Δ в 1,6 раза. При $D=10,00\dots10,22$ мм: уменьшение α от 90° до 45° способствует снижению Δ в 2,9 раза; уменьшение d от 2 до 1 мм способствует снижению Δ в 1,7 раза. Уменьшение d приводит к повышению длительности $t_{\text{и}}$ измерений: при уменьшении d от 2 до 1,5 мм $t_{\text{и}}$ возрастает в 1,3, а до 1 мм – в 2,3 раза.

4.2. Зависимость $\Delta = f(V)$, погрешности Δ измерений от объема V измерительной камеры имеет экстремальный характер с минимумом в диапазоне от $8,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ до $4,16 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$, причем при использовании измерительного сопла большего диаметра d требуется увеличение объема V .

4.3. Повышение верхнего порогового уровня $p_{\text{в}}$ приводит к снижению погрешности Δ измерений: при увеличении $p_{\text{в}}$ от 190 до 230 кПа погрешность Δ снижается в 1,3 раза. Зависимость $\Delta = f(p_{\text{н}})$ погрешности измерений Δ от нижнего порогового уровня $p_{\text{н}}$ давления имеет экстремальный вид с минимумом в диапазоне 108...117 кПа независимо от других параметров устройства.

5. Установлено рациональное сочетание рабочих и конструктивных параметров УВП: $\alpha = 30^\circ\dots45^\circ$, $d = 1$ мм, смещение l измерительного сопла из уравнения $F_3^{\text{max}} = 0,4F_{\text{с}}$, $V = 1,66 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$, $p_{\text{н}} = 190\dots230$ кПа, $p_{\text{в}} = 0,96p_{\text{н}}$, $p_{\text{н}} = 110$ кПа, которое обеспечивает контроль диаметра D сортируемых деталей с погрешностью $\pm 0,27\dots\pm 0,45$ мкм в диапазоне шириной 200...300 мкм и длительность $t_{\text{и}}$ измерений не более 0,3 с.

6. Разработаны новые УВП на основе предложенных схем временного преобразования размера сортируемых деталей, защищенные патентами РФ на полезную модель (№№ 139662, 148813, 154374, 161311, 161313) и алгоритмы автоматического управления процессами измерения и сортировки в этих устройствах (свидетельства Гос. рег. программы для ЭВМ №№ 2014616406, 2016613432). Предложены методики и рекомендации расчета рабочих и конструктивных параметров, оценки точности и производительности, а также эксплуатации АКСУ на основе разработанных УВП.

7. Предложено конструктивное исполнение АКСУ для сортировки твердосплавных цилиндрических зубков буровых коронок по величине диаметра в 46 групп шириной 5 мкм с погрешностью не более $\pm 0,7$ мкм и производительностью не менее 20 шт./мин. Техническая документация передана для внедрения на ЗАО ПСК «Сталь-трест» (г. Апрелевка). Работа выполнена в рамках гранта №35/762-15 ВолгГТУ.

8. Полученные в работе результаты могут быть использованы для разработки новых автоматических устройств для контроля и сортировки деталей по величине внутреннего диаметра, а также нецилиндрических деталей. Решение этих задач требует дополнительных исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО

в журналах Перечня ВАК РФ:

1. Плешаков А. А., Кристаль М. Г. Теоретическая оценка передаточной функции и погрешности измерения автоматического пневмоэлектронного устройства // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 5. С. 24-27. (0,46 п. л. / 0,23 п. л.).
2. Плешаков А. А., Кристаль М. Г. Экспериментальное исследование пневмоэлектронного измерительного устройства для автоматической сортировки деталей перед селективной сборкой // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. №3. С. 23-27. (0,58 п. л. / 0,29 п. л.)
3. Пневматическое сортировочное устройство / А.А. Плешаков [и др.]. // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 6. С. 14-16. (0,35 п.л. / 0,1 п.л.)
4. Плешаков А. А., Кристаль М. Г. Точность временного преобразования линейного размера детали в пневматическом измерительном устройстве с переменным выходным дросселем // Измерительная техника. 2016. № 1. С. 22-25. (0,46 п. л. / 0,23 п. л.)
(Pleshakov A. A., Kristal' M. G. Precision of Time Conversion of the Linear Dimensions of a Part in a Pneumatic Measuring Device with Variable Output Throttle // Measurement Techniques. 2016. Vol. 59, Issue 1. P. 28-33).

в патентах:

1. Пневматическое устройство для контроля и сортировки деталей по линейным размерам: пат. на п. м. 139662 РФ, МПК G01B 13/00. / А. А. Плешаков, М. Г. Кристаль, А. Ю. Горелова. 2013151959/28; Заявл. 21.11.2013; Оpubл. 20.04.2014; Бюлл. 11.
2. Пневмоэлектронное устройство для контроля и сортировки деталей по линейным размерам: пат. на п.м. 148813 РФ, МПК G01B 13/00. / А.А. Плешаков [и др.]. 2014120814/28; Заявл. 22.05.2014; Оpubл. 20.12.2014; Бюлл. 35.
3. Пневмоэлектронное устройство для контроля и сортировки деталей по линейным размерам: пат. на п. м. 154374 РФ, МПК G01B 13/00. / А. А. Плешаков, А. Ю. Горелова, М. Г. Кристаль. 2014154561/28; Заявл. 31.12.2014; Оpubл. 20.08.2015; Бюлл. 23.
4. Пневмоэлектронное устройство для контроля и сортировки деталей по линейным размерам: пат. на п. м. 161311 РФ, МПК G01B 13/00. / А. А. Плешаков, М. Г. Кристаль. 2015150426/28; Заявл. 24.11.2015; Оpubл. 20.04.2016; Бюлл. 11.
5. Пневмоэлектронное устройство для контроля и сортировки деталей по линейным размерам: пат. на п. м. 161313 РФ, МПК G01B 13/00. / А. А. Плешаков, М. Г. Кристаль. 2015150456/28; Заявл. 24.11.2015; Оpubл. 20.04.2016; Бюлл. 11.

в свидетельствах о гос. регистрации программы для ЭВМ:

1. Свидетельство Гос. рег. программы для ЭВМ № 2014616406. Программа управления устройством для сортировки деталей на группы по линейным размерам / Плешаков А.А. [и др.]. 2014.
2. Свидетельство Гос. рег. программы для ЭВМ №2016613432. Программа управления пневмоэлектронным измерительным устройством / Плешаков А. А., Горелова А. Ю., Кристаль М. Г. 2016.